

卒業論文      2012年度 (平成24年度)

ゲームコンソールに対応する大規模 NAT の設計と実装

慶應義塾大学 総合政策学部

谷口 悠

## ゲームコンソールに対応する大規模 NAT の設計と実装

IPv4 アドレスの枯渇問題を受けてインターネットのプロトコルを IPv6 に移行する重要性が叫ばれているが、インターネット上のサーバがある短い期間の間に IPv6 に対応することは極めて難しい。そのため、インターネットを段階的に IPv6 へと移行させる作業が完了するまで IPv4 の延命をするべく、一つのグローバル IPv4 アドレスを、複数のマシンで共有する大規模 NAT (LSN) 技術の導入が検討されている。IPv4 ネットワークは今後 10 年以上に渡って継続して利用されると言われており、LSN は一過性の対策ではなく、インターネットに存在する現有の膨大な資産を延命させる意味でも、重要な技術である。しかし一方で LSN は、一人のユーザーが利用できるポート数に制限が発生したり、一部のアプリケーションが利用できない可能性があるという問題点を抱えている。

問題が発生しうるアプリケーションの例として、外部からの接続において、特定のポートを要求するものが挙げられる。このようなアプリケーションを大規模 NAT 導入後にも利用するにあたっては通信方式に変更を加えるなどのアップデートを行う必要があるが、現在広く普及しているゲームコンソールで動作するネットワークゲームソフトウェアは、書き換えのできないディスクメディア等による媒体での販売が行われており、ネットワーク構成の変化に柔軟に対応することが困難であり、大規模 NAT 環境下で実行することができないのではないかという懸念がある。

そこで本研究ではゲームコンソールを対象を絞り大規模 NAT が導入される想定のもとにどのような問題が起こり得るのかを調査と検証をした結果、現在広く遊ばれているネットワークゲームソフトウェアが変わりなく実行できる大規模 NAT の仕様の提案と実装を行った。

### キーワード

1. 大規模 NAT, 2. NAT 越え, 3. オンラインゲーム, 4. IPv4 枯渇問題

Design and implementation of Large Scale NAT compatible with video game console
--

The importance of shifting the IPv6 from IPv4 is claimed, due to IPv4 addresses are drying up. However, it is very difficult for servers on the Internet to apply IPv6 addresses in a short period of time. Therefore, while we wait for the Internet to apply IPv6 addresses to be phased, a large scale of NAT (LSN) technology is considered, which shares one global IPv4 address, so as to help IPv4 prolong. It is said that IPv4 network will be used for more than 10 years, while LSN works not only as a temporary measure, but as an important technology to keep the massive amount of property in the internet. However, LSN has a few problems: LSN cannot serve many ports to the user, and also there is a possibility of making some of the applications unavailable to use. As an example for applications that may have trouble, some connection from outside may demand a specific port. For these types of applications, changing the way of correspondence should be considered after a large scale of NAT is introduced. However, Network Game Software that operates with a game console is a disc-media that cannot be revised. Therefore, there is a possibility that these software cannot correspond with the large scaled NAT environment. From these facts, this thesis targets on game consoles, experimented and studied what kind of problems may appear when the large scaled NAT is introduced. Afterwards, implemented the NAT where Network Games Software played today can be played.

Keywords :

1. Large Scale NAT 2. NAT Traversal, 3. Online Game 4. IPv4 address exhaustion

---

Yu Taniguchi

---

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	研究の背景	1
1.2	本研究の目的	2
1.3	本研究の成果	2
1.4	構成	2
<b>第 2 章</b>	<b>NAT</b>	<b>3</b>
2.1	NAT とは	3
2.2	RFC4787 に基づく UDP の NAT 特性	4
2.2.1	マッピング生成規則	4
2.2.2	IP アドレスプーリング	4
2.2.3	ポート割り当て	5
2.2.4	ポートパリティ	5
2.2.5	マッピングタイマー	5
2.2.6	マッピングタイマーリフレッシュ方向	6
2.2.7	フィルタリング特性	6
2.2.8	ヘアピンの挙動	7
2.3	UDP による NAT 越え	7
2.3.1	UDP Hole Punching	7
2.3.2	UPnP(Universal Plug and Play)	8
2.4	大規模 NAT	9
2.4.1	大規模 NAT とは	9
2.4.2	大規模 NAT の要件	10

---

2.4.3	大規模 NAT と家庭用ルータとの違い	12
2.4.4	大規模 NAT の問題点	12
<b>第 3 章</b>	<b>オンラインゲーム</b>	<b>13</b>
3.1	オンラインゲームの基礎知識	13
3.1.1	オンラインゲームとは	13
3.1.2	オンラインゲームのネットワーク構成	13
3.1.3	オンラインゲームの種類	15
3.1.4	ゲームコンソールのネットワークの調査	15
3.1.5	考察	17
3.2	まとめ	18
<b>第 4 章</b>	<b>オンラインゲーム対応の大規模 NAT 設計</b>	<b>19</b>
4.1	問題点	19
4.1.1	セッション数制限	19
4.1.2	使用ポートの競合	19
4.1.3	UPnP の利用	20
4.1.4	ヘアピン問題	20
4.2	要件	20
4.3	設計	21
<b>第 5 章</b>	<b>実装と評価</b>	<b>22</b>
5.1	実装	22
5.1.1	実装環境	22
5.1.2	実装内容	22
5.2	評価	23
5.2.1	インターネット越しの通信	23
5.2.2	大規模 NAT 越しの通信	23
5.2.3	CPE 越しの通信	24
5.3	考察	25
<b>第 6 章</b>	<b>結論</b>	<b>26</b>

---

6.1	本研究のまとめ . . . . .	26
6.2	今後の課題と展望 . . . . .	26
	<b>謝辞</b>	<b>28</b>
	<b>参考文献</b>	<b>29</b>

---

# 目次

2.1	NAT によるアドレス変換 . . . . .	3
2.2	UDP Hole Punching . . . . .	7
2.3	UPnP . . . . .	8
2.4	大規模 NAT . . . . .	9
3.1	C/S 型ネットワーク . . . . .	14
3.2	P2P 型ネットワーク . . . . .	14
5.1	インターネット越しの通信 . . . . .	23
5.2	大規模 NAT 越しの通信 . . . . .	24
5.3	CPE 越しの通信 . . . . .	25

---

# 表目次

3.1	PlayStation3 の NAT タイプ表記対応表 . . . . .	16
3.2	XBOX360 の NAT タイプ表記対応表 . . . . .	17
5.1	実装環境 . . . . .	22

---

# 第 1 章

## 序論

本章では、本研究を行うに至った背景、研究の目的、研究結果、本論文の構成を記す。

### 1.1 研究の背景

2011 年 2 月 3 日、インターネット上で利用されるアドレス資源をグローバルに管理する IANA (Internet Assigned Numbers Authority) において新規に割り振りできる IPv4 アドレスが枯渇した。これを受け、インターネットのプロトコルを IPv6 に移行する重要性が叫ばれているが、インターネット上のサーバがある短い期間の間に IPv6 に対応することは極めて難しい。そのため、インターネットを段階的に IPv6 へと移行させる作業が完了するまで IPv4 の延命をするべく、一つのグローバル IPv4 アドレスを、複数のマシンで共有する大規模 NAT(LSN,CGN) 技術の導入が検討されている。IPv4 ネットワークは今後 10 年以上に渡って継続して利用されると言われており、大規模 NAT は一過性の対策ではなく、インターネットに存在する現有の膨大な資産を延命させる意味でも、重要な技術である。しかし一方で大規模 NAT は、一人のユーザーが利用できるポート数に制限が発生したり、一部のアプリケーションが利用できない可能性があるという問題点を抱えている。

問題が発生しうるアプリケーションの例として、外部からの接続において、特定のポートを要求するものが挙げられる。このようなアプリケーションを大規模 NAT 導入後にも利用するにあたっては通信方式に変更を加えるなどのアップデートを行う必要があるが、現在広く普及しているゲームコンソールで動作するネットワークゲームソフトウェアは、書き換えのできないディスクメディア等による媒体での販売が行われており、ネットワーク構成の変化に柔軟に対応することが困難であり、大規模 NAT 環境下で実行することができないのではないかという懸念がある。

## 1.2. 本研究の目的

---

ゲームコンソールにおけるインターネットを利用したゲームプレイの割合は年々増加しており、多くのユーザーを抱えるプラットフォームが利用できなくなることは問題である。

そこで本研究ではゲームコンソールを対象を絞り大規模 NAT が導入される想定のもとにどのような問題が起こり得るのかを調査し、現在広く遊ばれているネットワークゲームソフトウェアが変わりなく実行できる大規模 NAT の仕様を提案する。

## 1.2 本研究の目的

本研究の目的は、現在広く遊ばれているゲームコンソール上で動作するオンラインゲームのネットワークを解析し、その要件に基づき最適である NAT 構成を提案し、実装をおこなうことにより、オンラインゲームに適切な大規模 NAT や家庭用ルーターの構成とはどのようなものであるべきかを検証することである。

## 1.3 本研究の成果

様々な調査と検証を行った結果、大規模 NAT が導入されるにあたって理想的となる構成が明らかとなった。その詳細に関しては、第 4,5 章にて記す。

## 1.4 構成

本論文は全 6 章で構成される。第 2 章では、NAT の特性について整理し、大規模 NAT について詳しく言及する。第 3 章では、オンラインゲームとは何かを具体的に明示した上で、そのネットワーク特性を明らかにする。第 4 章では、オンラインゲームのネットワーク特性に対して NAT 特性や大規模 NAT がどのように関連するのかを示し、オンラインゲームが実行可能である大規模 NAT の要件を提案する。第 5 章では、第 4 章で述べた NAT 構成を実際に構築し、様々な構成で動作検証を行った結果を述べる。最後に第 6 章で本論文の結論を述べる。

# 第 2 章

## NAT

本章では、NAT の特性について整理し、大規模 NAT の問題が発生し得る点について言及する。

### 2.1 NAT とは

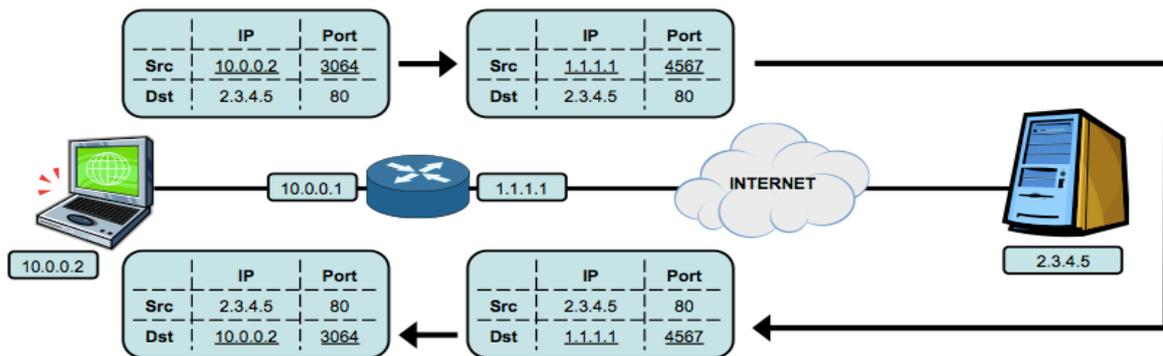


図 2.1 NAT によるアドレス変換

本研究における NAT(Network Address Translation) とは、パケットヘッダに含まれる IP アドレスを、別の IP アドレスに変換する技術、および機器を指す。プライベート IP アドレスとグローバル IP アドレスの対応が常に 1 対 1 になる「静的 NAT」、用意したグローバル IP アドレスのプールの中で、プライベート IP アドレスとグローバル IP アドレスと 1 対 1 に対応させる「動的 NAT」と称し、IP アドレスを変換する際に、ポート番号も変換する仕組みを持つものを「NAPT」と称する。近年国内の家庭用に提供されるブロードバンドルーターにはほぼ必ずこの機能が導入されており、多くの家庭内ネットワークの上流には NAT が仕込まれていることになる。

## 2.2 RFC4787 に基づく UDP の NAT 特性

STUN(RFC3489 / 5389) は、NAT の存在と特性を判断し、エンドポイントが NAT によって割り当てられた IP アドレスとポート番号を得るプロトコルである。RFC3489 では STUN の判定により、NAT は Full Cone, Restricted Cone, Port Restricted Cone, Symmetric の 4 種類に分類されており、NAT の特性を表記として歴史的にこの分類が用いられている。しかし、これは NAT の特性を説明するには不十分であるため、RFC4787 では個々の NAT の特性を、様々な項目に対して明確に定めている。本研究はこの表現に基づき、NAT の特性について言及する。

### 2.2.1 マッピング生成規則

#### エンドポイント非依存

NAT は、同じ内側 IP アドレスとポートからどの外側 IP アドレスへ送信するパケットについてもポートマッピングを再利用する。そのため、一度でも通信を行ったことのある相手であれば、その後の通信も可能となる。

#### アドレス依存

NAT は、同じ内側 IP アドレスとポートから同じ外側 IP アドレスへ送信するパケットについてポートマッピングを再利用する。そのため、最初に送信した宛先以外からはパケットを受け取らず、同一ソケットから別の宛先に送った場合は、NAT に別の IP アドレスがマップされる。

#### アドレス/ポート依存

”アドレス依存”のマッピングの挙動における、外側 IP アドレスにポート番号が加わったもの。

### 2.2.2 IP アドレスプーリング

#### 任意

ひとつの内側 IP アドレスに対し、NAT の外側のアドレスプールの中から複数の外側 IP アドレスがマップされる。特定のエンドポイントに割り当てられた IP アドレスを隠蔽する手段として用いられるが、複数のポートを使用するアプリケーションで問題が発生する可能性がある。

## 2.2. RFC4787 に基づく UDP の NAT 特性

---

### ペア

同じ内側 IP アドレスに対する全てのセッションが、NAT の外側のアドレスプールの中から同じ外側 IP アドレスにマップされる。

### 2.2.3 ポート割り当て

#### ポート維持

外側 IP アドレスとポートへのマッピングの際に、内側で使用したポート番号と同じ物を利用する。全ての利用可能な外側 IP アドレスで同じポートが既に使用中であれば、NAT はこれ以上”ポート維持”はせず、別のポート番号を用いる。

#### ポート多重

外側 IP アドレスとポートへのマッピングの際に、内側で使用したポート番号と同じ物を利用する。既にポートが使用中であっても”ポート維持”が行われる。

#### ポート維持なし

どのような場合でも、外側ポート番号と内側ポート番号を合わせることを試みない。

### 2.2.4 ポートパリティ

ポートマッピングにおいて、ポートパリティ維持が”Yes”の挙動を持っていれば、UDP ポートの偶数ポートは偶数ポートにマップされ、奇数ポートは奇数ポートにマップされる。この挙動は RTP が偶数ポート、RTCP が奇数ポートを使用するという規則を尊重している。

### 2.2.5 マッピングタイマー

マッピングタイマーとは、パケットが NAT を越えることがなくマッピングが有効な状態で留まっている時間である。

### 2.2.6 マッピングタイマーリフレッシュ方向

#### 外向き

パケットがNATの内側から外側に出て行くときにマッピングタイマーの値をリフレッシュする。

#### 内向き

パケットがNATの外側から内側に入ってくるときにマッピングタイマーの値をリフレッシュする。

### 2.2.7 フィルタリング特性

内側エンドポイントがNATを通る外向きセッションを開くと、NATは内側IP:ポート(X:x)と外側IP:ポート(Y:y)タプル間のマッピングのためにフィルタリングルールを割り当てる。

#### エンドポイント非依存

NATは(X:x)の組み合わせに向けられたどんなパケットも転送し、この組み合わせに向けられていないパケットのみを無視する。そのため、一度NATの内側から外部にパケットが送られると、内側のエンドポイントにはどんなパケットでも通すことを許容している。

#### アドレス依存

(X:x)からNATを介して外側IPアドレスY(ポート番号は問わない)にパケットが送られたとき、NATはYから(X:x)への通信を許可する。また、NATは(X:x)に向けられていないパケットを無視する。

#### アドレス/ポート依存

”アドレス依存”のフィルタリングの挙動における、外部アドレスにポートが加わったもの。

## 2.3. UDP による NAT 越え

---

### 2.2.8 ヘアピンの挙動

ヘアピンとは、NAT 配下の端末から、同じ NAT 配下の別の端末に対して NAT 設定を行なわれた外側 IP アドレス、ポートを指定してアクセスした際に、対応する内側アドレス側に転送を行う機能であり、NAT ループバック、IP ループバックとも呼ばれる。

## 2.3 UDP による NAT 越え

クライアント同士が P2P での通信を行う際、近年ではほとんどのプレイヤーの PC やゲーム機が NAT 機能を持つルータで守られた住宅内ネットワークに接続されているので、グローバル IP アドレスを指定して直接通信を確立することができない。これを回避するために、NAT 越え (NAT Traversal) と呼ばれる技術が必要となる。以下に NAT ルータ下のプライベートネットワークにあるゲームコンソール同士が実際に利用している、インターネット経由で UDP 接続を確立する手法を挙げる。

### 2.3.1 UDP Hole Punching

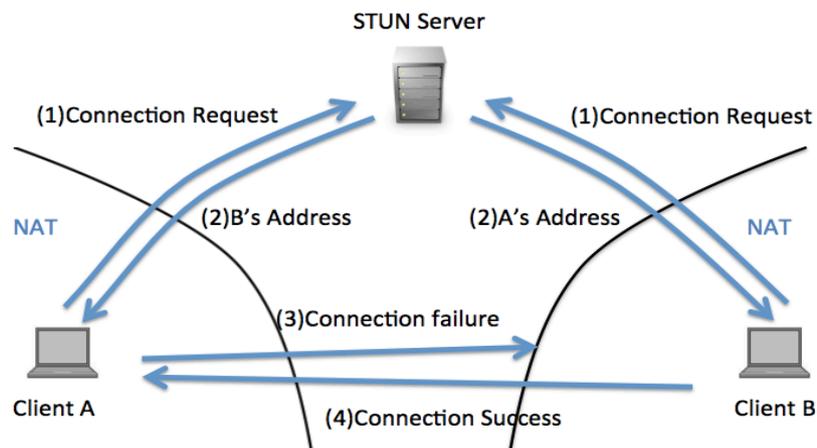


図 2.2 UDP Hole Punching

UDP Hole Punching は、多くの NAT のマッピング、フィルタリング属性に対応できる NAT 越

### 2.3. UDP による NAT 越え

えの手法である。その仕組みとしては、まず P2P 通信を行いたい双方のクライアントが STUN サーバーに相手のアドレスを問い合わせる。一方が相手に向けてパケットを送出する。相手先は NAT の内側なので、このパケットは相手に届かないが、NAT ルータ A の NAT エントリに A から B へのエントリが作成され、B からのパケットを受信可能な状況ができる。

次に B は、A に対してパケットを送信する。今度はルータ A の NAT テーブルにエントリがあるので、パケットはコンピュータ A に到着する。つまり、A から送信された UDP パケットに対する応答パケットを B が作成し、A に対して送信することで、UDP パケットの送信と、それに対する応答であるかのように見せ掛けている。

#### 2.3.2 UPnP(Universal Plug and Play)

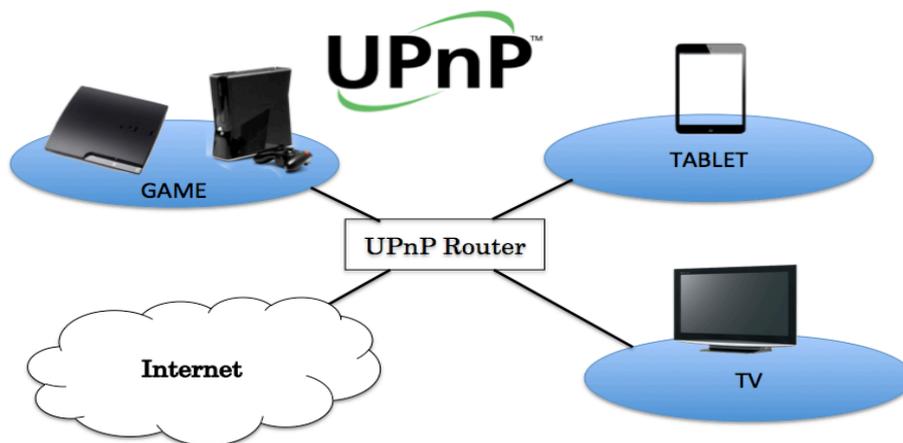


図 2.3 UPnP

UPnP は Intel、Microsoft、HP などが中心となって策定している機器制御技術である。エンドホスト上で動作するアプリケーションが特定のマルチキャストアドレスに送信したマッピング要求パケットを UPnP に対応したルーターが受け取ることで、IP アドレスの割り当て、名前解決、デバイスの発見と機能の把握が行われる。これにより、Ethernet や無線 LAN、IEEE1394(over IP) ネットワーク上にある様々な機器をルーターに接続するだけでネットワーク上での利用が可能となる。

## 2.4 大規模 NAT

### 2.4.1 大規模 NAT とは

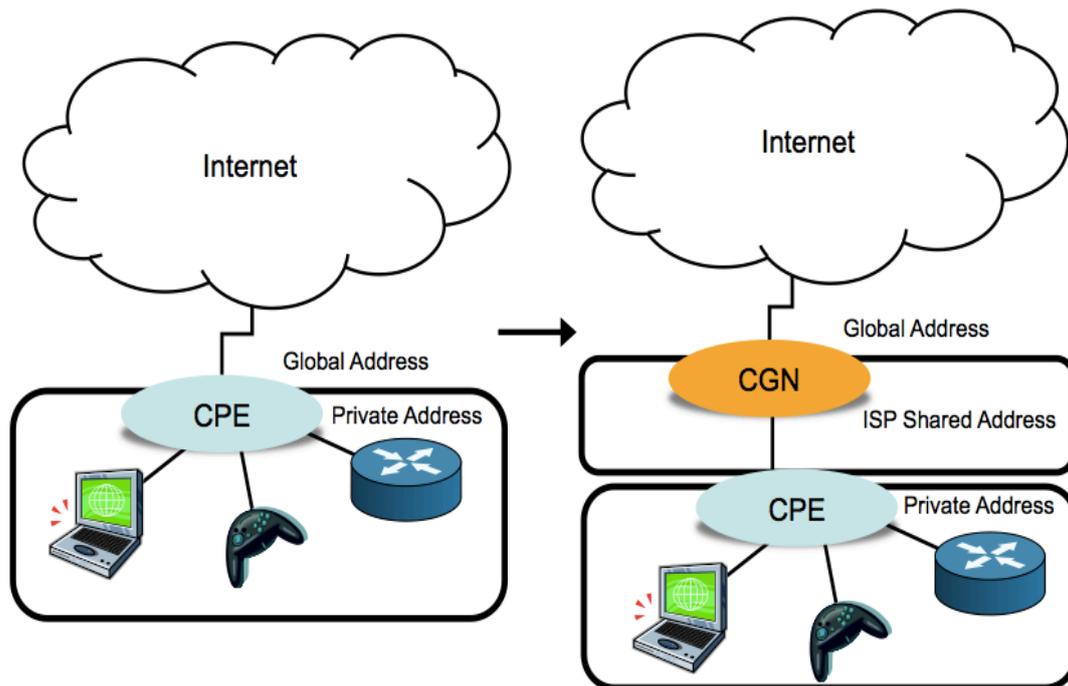


図 2.4 大規模 NAT

大規模 NAT は、企業内ネットワークや家庭内ネットワークの中で用いられるプライベート IP アドレスの範囲を ISP のネットワーク網まで広げることにより、IPv4 アドレスの節約に貢献する技術である。大規模 NAT は NAT 機能を ISP 側で稼働する加入者収容ルータに搭載したもので、一つのグローバル IP アドレスに複数のユーザを収容することができる。現在ほとんどの場合において ISP はユーザに対しグローバル IP アドレスを提供しているが、大規模 NAT 導入後はユーザにはグローバル IP アドレスの代わりにプライベート IP アドレスが提供されることになる。このように、大規模 NAT と CPE(Customer Premises Equipment) の二重 NAT となるモデルを NAT444 と呼び、本研究における大規模 NAT とはこの構成を指すものとする。大規模 NAT の導入は ISP 側のネットワーク構成の変更を行うのみで、ユーザ宅内の装置の変更を必要としないという点で、

## 2.4. 大規模 NAT

---

IPv4 枯渇問題へのソリューションとして大きな価値を示している。

### 2.4.2 大規模 NAT の要件

現状国内における携帯電話通信網や公衆無線 LAN サービスに大規模 NAT の導入が行われた事例はあるが、家庭用固定インターネット回線への導入事例は無く、その具体的な仕様は依然として協議中である。

IETF-Draft の Common requirements for IP address sharing schemes draft-ietf-behave-lsn-requirements-10 による、現状の大規模 NAT の要件は以下の通りである。

1. 指定されたトランスポートプロトコルを含む CGN パケットを転送する場合、そのトランスポートプロトコルの動作要件を満たしている必要がある。UDP は RFC4787、TCP は RFC5382、ICMP は RFC5508、DCCP は RFC5597 に記述された内容に従う。
2. 大規模 NAT は RFC4787 で定義される、通常の "IP アドレスプーリング" を、"ペア" の動作で行う必要がある。大規模 NAT は、アプリケーションプロトコルごとに管理者がこの動作を変更できる機能を持っていてもよい。
3. 大規模 NAT の機能は外部アドレスプールのサイズや連続性に制限を持つべきではない。具体的には、大規模 NAT の機能は連続または非連続の外部 IPv4 アドレスの範囲で設定可能である必要がある。
4. 大規模 NAT は、ユーザーごとに割り当てられているポート数（または ICMP の識別子）を制限する必要がある。

ユーザー単位の制限は、大規模 NAT の管理者が設定しなければならず、プロトコルごとに独立した設定をすることもある。更に、大規模 NAT の CPU をユーザーが極端に消費することを防止するために、そのユーザーによる新しいマッピングの作成を制限するなど、大規模 NAT は管理者によって値の調整を可能にすることが推奨される。

5. 大規模 NAT は、マッピングごとおよびユーザーごとに割り当てられたメモリの量を制限できるようにすべきである。これは NAT の実装に応じて、フィルターやセッションなどの数を制限することを含む。

この制限は大規模 NAT の管理者によって設定されるべきである。また、割り当てられたメモリ消費の割合を制限することが可能であるべきである。

6. 管理者によって、特定の宛先アドレスまたはポートの変換を出来なくすることができる必要がある。

## 2.4. 大規模 NAT

---

7. 大規模 NAT が RFC4787 で定義される ”エンドポイント非依存フィルタリング”の挙動を行うことが推奨される。アプリケーション層プロトコルに問題を与えない場合であれば、”アドレス依存フィルタリング”を行なってもよい。
8. 外部ポートの割り当てが解除されたら、少なくとも 120 秒が経過するまで、新しいマッピングに再配分すべきではない。これには以下の様な例外がある。

大規模 NAT が TCP セッションをトラックしている場合であれば、TCP ポートは直ちに再利用してもよい。外部ポートが静的に内部アドレスに割り当てられていて、常にその状態が失われている場合であれば、ポートは直ちに再利用してもよい。更に、割り当てられた外部ポートが状態が失われるまでアドレス依存またはアドレス/ポート依存フィルタリングが行われていた場合、ポートは直ちに再利用してもよい。

再配分までの時間の長さとしてポートの最大数は大規模 NAT の管理者が設定できなければならない。
9. 大規模 NAT は、ユーザーに NAT マッピングを明示的に制御を与えるプロトコルを実装しなければならない。そのプロトコルは、ポート制御プロトコルであるべきである。
10. 大規模 NAT の実装者は、自分の機器を管理可能にするべきである。”Definitions of Managed Objects for NAT(RFC4008)”のような標準を用いて標準化を行うことが推奨される。
11. 大規模 NAT がリソースの制約や管理上の制限（容量制限）によって動的マッピングを作成することができないとき、元のパケットを落とさなければならない。このとき、パケットの送付者にコード 1（ホスト到達不能）と ICMP Destination Unreachable メッセージを送ったり、マネジメントシステム（そのように設定されている場合）に向かって SNMP トラップなどによって通知を送信すべきである。また、新しいマッピングを生成する領域を確保するために、既存のマッピングを削除してはいけない（これは通常の大規模 NAT の動作にのみ適用され、マニュアルオペレータが居る場合はこの限りではない）。
12. 管理上の理由でそうする必要のない限り、大規模 NAT は、宛先アドレスやポート番号をログに記録すべきではない。
13. 大規模 NAT はポート割り当てにおいて、最大限にポートを利用すべきである。
14. 大規模 NAT はポート割り当てにおいて、ログの大きさを最小にするべきである。
15. 大規模 NAT はポート割り当てにおいて、攻撃者がポート番号を知ることを困難にするべきである。

## 2.4. 大規模 NAT

---

### 2.4.3 大規模 NAT と家庭用ルータとの違い

前項に示した大規模 NAT の要件をもとに、一般的に普及している家庭用ルータの NAT 機能と大規模 NAT で異なる点を述べる。大規模 NAT は家庭用ルータとは異なり、一台の NAT で多数のユーザーを管理するという前提があるため、運営を行う上で複数のグローバル IP アドレスを割り当てられることになり、動的 NAT を行う必要がある。その上で、ひとつの CPE に対する全てのセッションが、アドレスプールの中から同じ外側 IP アドレスにマップされなければならない。これは、大規模 NAT 配下のクライアントが複数のセッションを張った際に、セッション毎に IP アドレスが異なってしまうと正常に動作しないアプリケーションやプロトコルが存在するためである。また、大規模 NAT の下に置かれる CPE 毎にポート割り当ての個数制限をする必要がある。UDP や TCP のポート数は宛先/送信元各 16 ビット長と有限であるため、複数の CPE でこれらのポートを公平に使うことができなければ、一人のユーザーによって全てのポートを確保され、他のユーザーが通信を行えなくなるなどの問題が発生する。

### 2.4.4 大規模 NAT の問題点

大規模 NAT が導入されることにより、既存の通信やアプリケーションの挙動に問題が発生する恐れがある。ここでは、考えられうる問題点を挙げる。

まず、1 ユーザ当たりの利用可能なポート数、もしくはセッション数に関して制限を行う必要がある。これにより、多くのセッションを要するアプリケーションが通信を行えなくなる可能性がある。また、一部の通信プロトコルが大規模 NAT 上で利用できなくなることがある。SIP のように内部の特定のフィールドに IP アドレスが記述されたプロトコルは、NAT を行う上で IP アドレスの置き換えを Application Level Gateway(ALG) 毎に処理を行わせる必要がある。NAT 越えの手法として挙げた UPnP は、大規模 NAT の導入によって NAT が多段になった環境では技術的な問題で正常に動作しない。他にも、グローバルアドレスで利用者の特定をすることができなくなることにより、広告バナーなどのアクセス解析やクライアント識別が困難になる等の問題がある。

---

## 第3章

# オンラインゲーム

本章では、オンラインゲームとは何かを具体的に明示した上で、そのネットワーク特性を明らかにする。

### 3.1 オンラインゲームの基礎知識

本節ではオンラインゲームを様々な観点から考察し、本研究で議論の対象となるオンラインゲームとは何かを論じる。

#### 3.1.1 オンラインゲームとは

本研究におけるオンラインゲームとは、以下のように定義する。

”コンピュータネットワークを介して専用のサーバや他のユーザーのクライアントマシン（パソコン、ゲーム機など）と接続し、オンラインで同じゲーム進行を共有することができる遊びを指す。”  
(ウィキペディア日本語版「オンラインゲーム」より引用)

本研究における対象となるオンラインゲームとは、大規模 NAT の導入を問題とする前提があるため、この定義のもとで、ゲームコンソールで動作し、更にインターネットを利用した通信をおこなうものに限定される。

#### 3.1.2 オンラインゲームのネットワーク構成

前項に記載したオンラインゲームで使用されるネットワーク構成は以下の通りである。

#### C/S(クライアント/サーバー)型

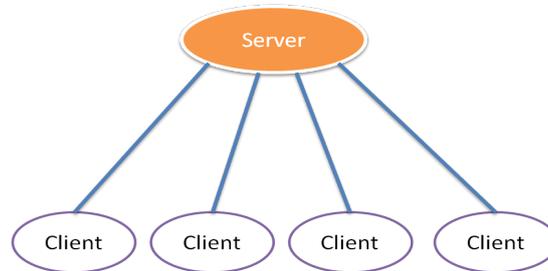


図 3.1 C/S 型ネットワーク

C/S 型のネットワーク構成では、ゲームクライアント同士がオンラインゲームの専用サーバーを経由することにより、データの送受信を行う。C/S 型はゲームクライアントからサーバーに対して接続を要求するため、ファイアウォール付きのルータの内部に端末が配置されている場合でも問題なく接続を確立することができる。

#### P2P 型

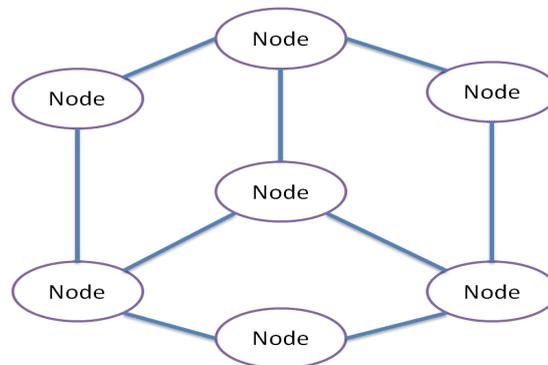


図 3.2 P2P 型ネットワーク

P2P 型のネットワーク構成では、ゲームクライアント同士が直接接続することにより、データの通信を行う。P2P 型の問題点として、NAT 機能を持つルータで守られた住宅内ネットワークにおいて、グローバル IP アドレスを指定して直接通信を確立できないことが挙げられる。これを回避

### 3.1. オンラインゲームの基礎知識

---

するため、NAT 越えの技術が必要になる。

#### 3.1.3 オンラインゲームの種類

オンラインゲームには大別して MO と MMO の 2 種類のゲームデザインがある。本項ではこれらの違いと特徴を説明する。

##### MO(Multiplayer Online)

MO ゲームは、比較的少人数が短期的にプレイするゲームジャンルに適したデザインである。具体的には、将棋や麻雀のようなテーブルゲームや、FPS や格闘ゲームのようなアクション性の高いゲームが挙げられる。アクション性の高いゲームはゲームの状態が高頻度で変化するため、多くのデータの送受信が必要となり、通信遅延やサーバのマシンコストを抑えるべく P2P 型で実装を行うことに合理性がある。

##### MMO(Massively Multiplayer online)

MMO ゲームの内容は、大人数が長期的にプレイするゲームが主である。膨大なデータを扱うソーシャルなゲーム内容に向くため、主に RPG のジャンルに利用される。MMO の特徴はゲーム内に長期に渡って連続的な時間が流れている必要があり、また、ゲームの規模による膨大なプレイヤーとの直接通信を行うことが困難であるため、サーバの存在が必要となる。そのため、完全な P2P 型で MMO のゲームを実装することはできない。RPG の他にもアクションゲームのジャンルも存在するが、通信にサーバを介する必要から、ラグについてシビアな問題を抱えている。

#### 3.1.4 ゲームコンソールのネットワークの調査

2013 年 1 月現在、オンラインゲームが動作する、広く普及しているゲームコンソールは PlayStation2, PlayStation3, PlayStation Portable, PlayStation Vita, XBOX360, Wii, WiiU, Nintendo DS, Nintendo 3DS の 9 機種である。この中でも、オンラインゲームサービスが充実しており、最も普及している PlayStation3 と XBOX360 を本研究の調査対象とする。ゲームコンソールは NAT 越しにインターネットに接続することを想定して設計されており、様々な NAT 環境下で他のクライアントと通信を行うために NAT 越えの技術を備えている。これらのゲームコンソールのネットワークを調査するため、Linux マシンの 2 つのネットワークインターフェース間で NAT

### 3.1. オンラインゲームの基礎知識

---

表 3.1 PlayStation3 の NAT タイプ表記対応表

NAT タイプ	NAT 特性
NAT1	NAT が存在しない
NAT2	マッピング生成規則：エンドポイント非依存 フィルタリング特性：エンドポイント非依存 または アドレス (/ポート) 依存
NAT3	マッピング生成規則：アドレス (/ポート) 依存 フィルタリング特性：アドレス (/ポート) 依存

を行い、Wireshark を用いたパケットキャプチャ環境を構築した。この項では、実際にルータとゲームコンソールの上に Linux マシンを挟み、NAT の構成を変更しながらパケットキャプチャを行った結果得られた機種毎のネットワーク特性について調査した結果をまとめる。

#### PlayStation3

PlayStation3 はオンラインゲームの通信は IPv6 には対応しておらず、IPv4 での通信を行う。PlayStation3 が使用するポートとプロトコルは、ソニーによる公式のアナウンスでは TCP : 80, 443, 3478, 3479, 3480, 5223, 8080 および UDP : 3478, 3479, 3658 であるとされているが、例として、“Call of Duty Black Ops”では UDP の 3074, 3075 番ポートが利用されるなど、ゲームソフトにより通信先のポートが異なることがある。

PlayStation3 の設定画面の NAT タイプの項目では、NAT の特性を「NAT1」、「NAT2」、「NAT3」の 3 種類に表記される。それぞれの NAT タイプ表記と RFC4787 に基づく NAT 特性は以下の表の通りである。

#### XBOX360

XBOX360 はオンラインゲームの通信は IPv6 には対応しておらず、IPv4 での通信を行う。XBOX360 が使用するポートとプロトコルは、マイクロソフトによる公式のアナウンスで TCP : 53, 80, 3074 および UDP : 53, 88, 3074 とされている。用意した 30 タイトルのゲームではゲーム中の P2P 通信は全て UDP の 3074 番ポート宛で行われていたが、Electronics Arts の FAQ によると、同社製のゲームタイトルに関しては、専用のサーバーに接続するものは異なるポート宛のパケットを送受信することがあるという例外も存在する。

### 3.1. オンラインゲームの基礎知識

---

表 3.2 XBOX360 の NAT タイプ表記対応表

NAT タイプ	NAT 特性
close	NAT が存在しない
open	マッピング生成規則：エンドポイント非依存 フィルタリング特性：エンドポイント非依存
moderate	マッピング生成規則：エンドポイント非依存 フィルタリング特性：アドレス (/ポート) 依存
strict	マッピング生成規則：アドレス (/ポート) 依存 フィルタリング特性：アドレス (/ポート) 依存

XBOX360 はハード独自のオンラインコミュニティの運営を行う Xbox LIVE Service サーバーが STUN サーバーとしての役割を持ち、ユーザー側の NAT 特性情報、外側 IP アドレス、ポート番号を得る。XBOX360 の設定画面の NAT タイプの項目では、NAT の特性を「close」、「open」、「moderate」、「strict」の 4 種類に表記される。それぞれの NAT タイプ表記と RFC4787 に基づく NAT 特性は以下の表の通りである。

#### 3.1.5 考察

双方のコンソール共にオンラインゲームの通信は IPv6 には対応しておらず、IPv4 のインフラを用いなければ通信を行うことができない。コンソールのファームウェアのアップデートで IPv6 への対応ができるかもしれないが、PlayStation3 はゲームタイトルおきに利用するポート番号が異なることから、ゲームの通信周りはハードウェアよりソフトウェアへの依存が強いと考えられる。そのため、過去に発売された全てのゲームソフトに対してアップデートを行う必要があり、現在のゲームコンソールの IPv6 対応はあまり現実的ではないと考えられる。

オンラインゲーム中の通信に関して、ゲームコンソールは CPE のアドレスを指定する形で P2P 型の通信を行っていた。パケットキャプチャから読み取れるゲームコンソールで P2P での通信が行われるフローは、以下のようであると推定できる。

1. STUN サーバによって NAT の特性 (マッピング/フィルタリング) が調査される。
2. 運営者によるゲームサーバが STUN の調査結果を取得し、コンソール同士のマッチングが行われる。

## 3.2. まとめ

---

3. ゲームサーバーからそれぞれのコンソールにマッチング相手のアドレス情報が伝えられる
4. 各々のコンソールがマッチング相手のアドレス情報をもとに、UDP Hole Punching を行う
5. P2P 通信が行われる

ゲームコンソール同士の通信のプロトコルには UDP が利用されていることがわかる。これは、ゲームの通信という信頼性よりも到達速度が重要であるデータに対し、TCP を使うと再送処理が実行され、大きな通信遅延が発生することでゲームの進行を著しく阻害してしまうことに原因があると考えられる。

また、ゲームコンソール用にリリースされている MMO タイプのゲームタイトルは各ハードで 10 本に満たない。MMO のシステムを持ったタイトルが家庭用ゲームハードに少ないことへの理由として、標準で利用できるコントローラーデバイスが他プレイヤーとの深いコミュニケーションを取ることに適さないことが挙げられるが、ハードウェアが即時的なデータのやり取りを行う UDP での通信に特化しているという技術的な側面が少なからず存在すると考えられる。

## 3.2 まとめ

本章ではゲームコンソールのネットワークの特性を明らかにした。ゲームコンソールのネットワークが第 2 章で述べた大規模 NAT とどのように関連するのかについては、次章にて述べる。

---

## 第 4 章

# オンラインゲーム対応の大規模 NAT 設計

本章では、第 2 章で述べた NAT 特性や大規模 NAT に対し、第 3 章で述べたオンラインゲームのネットワークがどのように関連するのかを示し、オンラインゲームが実行可能である大規模 NAT の要件を提案する。

### 4.1 問題点

第 3 章の検証により、ゲームコンソールにおけるオンラインゲームの大半の通信は他のクライアントとの P2P 通信上で、ゲームコンソール毎に異なる特定のポートに対する UDP パケットの送受信によるものであることが判明した。本項ではこのような通信特性が大規模 NAT 環境において発生しうる問題点を挙げる。

#### 4.1.1 セッション数制限

NAT という技術の制限上、1 つのグローバルアドレスに同時接続できるセッション数には制約がある。1 ユーザーに割り当てられる収容限界を超えると、アプリケーションは新しいセッションを張れず、通信を確立することができない。

#### 4.1.2 使用ポートの競合

一例として、前章での検証の通り、XBOX360 のゲームパケットは始点、終点共に 3074 番のポート番号を利用する。このとき、同じ NAT の下に複数の XBOX360 が接続すると、同

## 4.2. 要件

---

一ポート番号を複数台で共有することになるため、外部から NAT に届いたゲームパケットの宛先を見ても、別々の XBOX360 に転送する判定の基準が存在しない。

実際に家庭用ルーターに Xbox360 を二台接続してオンライン機能を利用したところ、一台は正常に通信を行うことができたが、もう片方は通信が頻繁に途切れ、正常にオンライン機能を利用することができなかった。

### 4.1.3 UPnP の利用

上記の使用ポートが競合する問題は、UPnP のマッピングの動的設定により回避をすることができる。同一ポート番号に届いたパケットを別のアドレスに転送できるのは、UPnP の制御によってポートアドレス変換が行われるためである。

XBOX360 の例であれば、一台の XBOX360 が NAT の外側 3074 番ポートを利用している場合、他の XBOX360 による通信で発生するパケットは、NAT が自動的に送信元をランダムなポート番号に変換し、その送信元ポートフィールドを書き換えられた上で外部ネットワークに転送される。変換後のランダムなポート番号とその XBOX360 のプライベートアドレスは NAT のテーブルに記録されており、外部から来るパケットはパケットの送信先をランダムなポート番号から 3074 番に書き換えられ、変換テーブルに基づいて到着すべき XBOX360 へと転送される。

しかし、プロトコルの仕様上、NAT が多段になる環境においては UPnP は上記のようなマッピングは自動的に行うことができない。そのため、必然的に多段 NAT 構成となる大規模 NAT 環境においては UPnP を利用することが困難である。

### 4.1.4 ヘアピン問題

大規模 NAT 環境では、同じ大規模 NAT 配下にあるゲームコンソール同士の通信が想定されるため、ヘアピン機能が実装されていなければ、通信を行うことができない。

## 4.2 要件

以上に挙げた問題点から、ゲームコンソールでのオンラインゲームが実行可能である大規模 NAT の要件を提案する。

### 4.3. 設計

---

前提として、第 2 章で挙げた大規模 NAT の要件と、RFC4787 に基づく NAT の要件を満たしている必要がある。NAT 越えの手法に関しては UPnP が利用できないため、STUN サーバーを用いた UDP Hole Punching のみを利用する。このとき、ポートが競合する問題に対応するため、動的なポートアドレス変換の実装が必要である。また、ヘアピンに対応しており、プライベートアドレス同士で通信を行える必要がある。

セッション数については、CPE に接続する機器はゲームコンソールのみではなく、またユーザーの利用方法により使用するセッション数が大きく変化するため、1 ユーザーに対して最低限確保する必要があるセッション数の判断が難しいため、ここでは考慮に入れないものとする。

## 4.3 設計

以上に挙げた要件をもとに、ゲームコンソールでのオンラインゲームが実行可能である大規模 NAT の設計は、以下の通りである。

大規模 LSN はゲームコンソールのトラフィックに対応し、動的な NATP 処理、マッピング、ポート開放処理を行う。RFC4787 に基づく UDP の NAT 特性は、ゲームコンソールの仕様をもとに、以下の通りに定めるべきであると考えられる。

- エンドポイント非依存マッピング
- IP アドレスプーリングはペア
- ポート維持なし
- ポートパリティ維持
- UDP のマッピングタイマーは 2 分間
- マッピングタイマーリフレッシュ方向は外向きに True
- エンドポイント非依存フィルタリング
- ヘアピン可

---

## 第 5 章

# 実装と評価

### 5.1 実装

Linux マシンを用いて、前章にて提案した構成の NAT を作成する。iptables の NAT 機能を利用した実装を行う。

#### 5.1.1 実装環境

実装環境を以下の表に示す。

エンドノートのゲームコンソールには XBOX360 を用いる。CPE として、ISP から家庭用ルータとして提供されている Aterm WARPSTAR WBR75H を用いる。

#### 5.1.2 実装内容

第 4 章にて示した大規模 NAT の設計に対し、Linux のパケットフィルタリング、NAT を設定するためのパッケージである iptables を利用し、シェルスクリプトを書くことによって実装を行う。本論文執筆時の現状では動的な NAT 処理を行うための実装が完了しなかったため、大規模 NAT に対するマッピングやポート開放の処理は手動で行う。

表 5.1 実装環境

CPU	Intel Celeron 2.66GHz
OS	ubuntu 12.04.1 LTS
Memory	512MB

## 5.2 評価

一般的なゲームコンソールのネットワーク構成に対して、大規模 NAT の導入を想定し、様々な構成にて実験を行う。

### 5.2.1 インターネット越しの通信

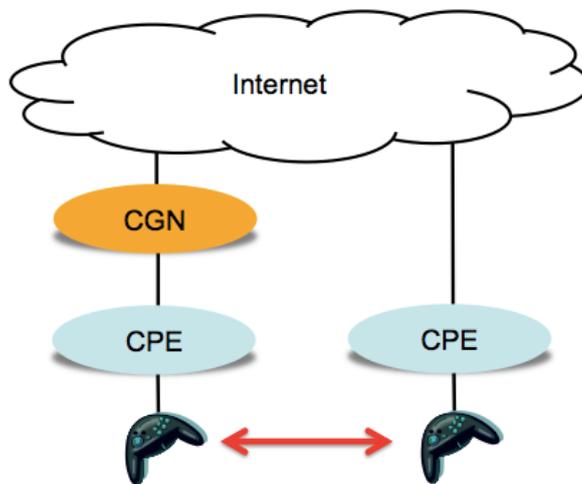


図 5.1 インターネット越しの通信

図 5.1 のように、ゲームコンソールとインターネットの間に家庭用ルータと大規模 NAT を挟んだ状態でオンラインゲームを実行する実験を行った。

XBOX360 の IP アドレスと CPE の WAN 側 IP アドレスを固定し、CPE と大規模 NAT に対してポート開放設定を行うことによって XBOX360 の NAT タイプ表記は open となり、インターネット越しの相手と問題なくオンラインゲームを遊ぶことができた。

### 5.2.2 大規模 NAT 越しの通信

図 5.2 のように、大規模 NAT 配下のゲームコンソール同士でオンラインゲームを実行する実験を行った。

## 5.2. 評価

---

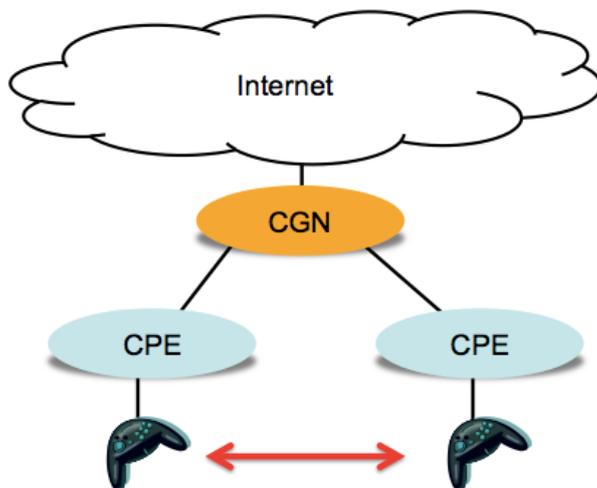


図 5.2 大規模 NAT 越しの通信

それぞれの XBOX360 と CPE の WAN 側 IP アドレスを固定し、CPE と大規模 NAT に対してポート開放設定を行うことによって両者の XBOX360 の NAT タイプ表記は open となり、互いにマッチング可能であり、両者ともに同時にインターネット越しの相手と問題なくオンラインゲームを遊ぶことができた。

### 5.2.3 CPE 越しの通信

図 5.3 のように、大規模 NAT 配下の CPE 配下のゲームコンソール同士でオンラインゲームを実行する実験を行った。

CPE の UPnP 機能を ON にした上で、CPE の WAN 側 IP アドレスを固定し、大規模 NAT に対してポート開放設定を行うことによって両者の XBOX360 の NAT タイプ表記は moderate となり、互いにマッチング可能であり、両者ともにインターネット越しの相手とオンラインゲームを遊ぶことができた。実験中には見られなかったが、NAT タイプが moderate と診断されているため何かしらの機能制限やマッチング不可という問題が発生する可能性がある。

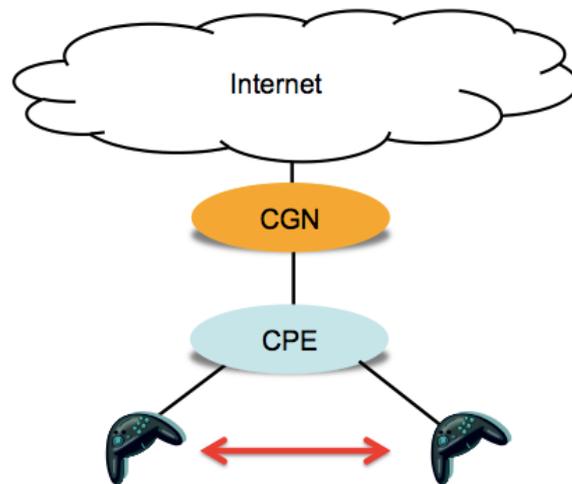


図 5.3 CPE 越しの通信

### 5.3 考察

今回の実装により、第 4 章で挙げた問題点のうち、セッション数以外の項目において大規模 NAT がオンラインゲームの接続性の問題を回避することができた。

しかし、大規模 NAT のコンセプトが如何にユーザー側の構成を変更せずにアドレス枯渇対策に貢献するかというものであるため、今回のようにユーザー側に機器の設定を要求する実装は改善すべきである。

今回実装できなかったマッピングやポート開放等の処理をスクリプトにより自動的に行わせるには、動的なマッピング、同スクリプトを cron に毎分実行させる必要があると考えられる。また、現状のままでは大規模 NAT としてのスケーラビリティに大変乏しく、第 2 章で示した要件をより多く満たす実装を行うことが今後の課題となる。

---

## 第 6 章

# 結論

### 6.1 本研究のまとめ

本研究の目的は、オンラインゲームに適切な大規模 NAT や家庭用ルーターの構成とはどのようなものであるべきかを検証することであった。

現在インターネットは IPv4 枯渇という大きな問題に直面しており、インターネットのプロトコルが IPv6 に移行するまでの間を延命することに早急な対応に迫られている。大規模 NAT は、既存のアドレス空間を拡張できるという点で IPv4 の延命策として非常に期待できるものだが、ISP で NAT が行われることによって挙動に問題が発生する可能性のあるアプリケーションが存在する。本研究では、問題が発生しうるアプリケーションのひとつとして、オンラインゲームに着目した。

NAT の性質とゲームコンソールが作り出すネットワークについて様々な整理を行った結果、大規模 NAT 環境においてゲームコンソールのネットワークに問題の発生しうる点を挙げることができ、大規模 NAT が導入されるにあたって理想となる構成が明らかとなった。

この構成をもとに本研究において実装した大規模 NAT は、多段 NAT、使用ポートの競合といった問題を回避し、様々な構成においても配下のゲームコンソールでオンラインゲームを正常に動作させることに成功した。

本研究は IPv4 枯渇問題への対応のひとつの分野として、貢献が期待できる。

### 6.2 今後の課題と展望

本研究は論文の執筆期限の兼ね合いと私の技術面で至らない部分があり、大規模 NAT 特有ののスケラビリティを評価できるような実装物を用意することができなかつたため、オン

## 6.2. 今後の課題と展望

---

ラインゲームの動作確認以上の評価項目を得られず、適切な評価を行うことができたとは言い難い。一方で、PlayStation3 や XBOX360 以外のゲームコンソールのネットワークなど、調査をする必要がある内容が残っている。このような課題に対し、引き続き取り組んでいきたいと考えている。

私はこの研究を始めるにあたって、オンラインゲームの誕生から現在までの歴史を漁り、トラフィックの調査を行うことで、アプリケーションの形成するネットワークの特徴を探ることが大変興味深く感じられた。今後は広い分野でアプリケーションのネットワークを調査し、大規模 NAT の導入に際し、より多くのアプリケーションを問題なく動作させる為の手法を考えていきたい。

---

# 謝辞

本卒業論文を執筆するにあたり、多くの人の助力をいただきました。

はじめに、本論文執筆にあたりご指導頂きました慶應義塾大学環境情報学部教授 村井純博士、同学部准教授 楠本博之博士、同学部教授 中村修博士、同学部専任講師 Rodney D. Van Meter 博士、同学部准教授 植原啓介博士、同学部准教授 三次仁博士、同学部教授 武田圭史博士、政策メディア研究科特任講師 佐藤雅明博士、同研究科特任助教 片岡広太郎博士、同研究科講師 Achmad Husni Thamrin 博士、同研究科特別研究教員 中島博敬氏、株式会社 NTT コミュニケーションズ 宮川晋氏に感謝します。

特に環境情報学部准教中村修博士、政策メディア研究科講師 Achmad Husni Thamrin 博士、同研究科特任助教片岡広太郎博士、同研究科特別研究教員 中島博敬氏、株式会社 NTT コミュニケーションズ 宮川晋氏には本論文執筆に辺り多大なご指導を頂きました。

そして、本研究を進めていく上で、様々な励ましと助言を頂きました、慶應義塾大学徳田/村井合同研究室の船柳孝明氏、木村翔氏、上野幸杜氏、数井翔氏、武田知也氏、Myunes Shareef 氏、同研究室 OB / OG である村上滋樹氏、常田彩都美氏に感謝します。

研究に協力をして頂いた、徳田・村井合同研究室の皆様感謝します。

学生アパートホロン湘南の皆様、ゲームプログラミング SA の皆様、そして私が所属したゲームサークル DICE、スペイン舞踊部、GAPCOM の部員の皆様に感謝します。私の4年間の大学生活における心の充実は、彼等なくては有り得ないものでした。

最後に、大学入学からの4年間だけでなく、私の人生をあらゆる面で支えて頂いた父 谷口修、母 谷口民子、姉 谷口萌に感謝します。

2013年1月 谷口 悠

---

## 参考文献

- [1] 日本ネットワークインフォメーションセンター, IPv4 アドレスの在庫枯渇に関して, <http://www.nic.ad.jp/ja/ip/ipv4pool/>, 2011
- [2] Bryan Ford, Pyda Srisuresh, Dan Kegel, Peer-to-Peer Communication Across Network Address Translators, <http://www.brynosaurus.com/pub/net/p2pnat/>, 2005
- [3] J. Rosenberg, J. Weinberger, C. Huitema, R. Mahy, STUN - Simple Traversal of User Datagram Protocol (UDP) Through Network Address Translators (NATs), RFC 3489, IETF, 2003
- [4] J. Rosenberg, R. Mahy, P. Matthews, D. Wing, Session Traversal Utilities for NAT (STUN), RFC5389, IETF, 2008
- [5] F. Audet, Ed., C. Jennings, Network Address Translation (NAT) Behavioral Requirements for Unicast UDP, RFC4787, IETF, 2007
- [6] Wikipedia 日本語版, オンラインゲーム, <http://ja.wikipedia.org/wiki/オンラインゲーム>
- [7] PS3 — インターネット接続テスト, <http://manuals.playstation.net/document/jp/ps3/current/settings/connecttest.html>
- [8] [全機種] FIFA 13: 何番のポートを開放すればいいですか?—EA Help, <https://help.ea.com/jp/article/what-online-ports-should-i-open-for-fifa-13>
- [9] Xbox LIVE で使用するネットワーク ポート, <http://support.xbox.com/ja-JP/xbox-live/connecting/network-ports-used-xbox-live>
- [10] NATs and Xbox LIVE, Xbox Engineering Blog, Xbox.com Forums, [http://forums.xbox.com/xbox\\_forums/b/engineering.blog/archive/2011/06/21/nats\\_2d00\\_and\\_2d00\\_xbox\\_2d00\\_live.aspx](http://forums.xbox.com/xbox_forums/b/engineering.blog/archive/2011/06/21/nats_2d00_and_2d00_xbox_2d00_live.aspx)

- 
- [11] S. Perreault, Ed., Viagenie, I. Yamagata, S. Miyakawa, A. Nakagawa, H. Ashida,  
Common requirements for IP address sharing schemes, IETF, 2012